中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):168-183
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025298

基于根系性状的花生抗旱种质鉴定与评价

尚随腾[1],于冰洁[2],于月华[1*],苗昊翠[2*],侯献飞[2],李强[2],贾东海[2],顾元国[2],苏杭[2],闫波[1]
(1.新疆农业大学农学院,新疆 乌鲁木齐,830052;
2.新疆维吾尔自治区农业科学院作物研究所/农业农村部乌鲁木齐野外综合观测站,新疆 乌鲁木齐,830091)

摘要:为探究苗期及全生育期干旱胁迫对花生根系生长发育的影响,鉴定抗旱种质并明确抗旱鉴定关键指标,为花生抗旱育种提供依据,以103份花生种质为材料,开展苗期盆栽控水及全生育期田间控水试验,通过对根系鲜重、根系干重、根系长度等11个指标进行相关性分析、主成分分析、隶属函数法、聚类分析和灰色关联度分析,对不同花生种质的抗旱性进行综合评价,并筛选抗旱指标。结果表明,不同时期干旱胁迫对根系鲜重、根系干重等多个指标均有显著的抑制作用,而根冠比、干鲜比等指标在干旱胁迫后有所上升。两个时期大多根系相关指标抗旱系数为显著或极显著相关;基于D值,通过聚类分析将103份花生种质资源在苗期及全生育期均分为5类,分别是极度干旱敏感型(Ⅰ)、强干旱敏感型(Ⅱ)、中度干旱敏感型(Ⅲ)、中度抗旱型(Ⅳ)、强抗旱型(Ⅴ)。苗期聚类结果表明,Ⅰ类仅占总数的1.90%,Ⅴ类占总数的17.47%,冀5059的D值最大,为0.87,是供试品种内抗旱性最强种质,而Z5235的D值最小,为极度干旱敏感型种质;全生育期聚类结果表明,Ⅰ类占总数的23.33%,Ⅴ类占总数的3.80%,GH01464 D值最大为0.70,抗旱性最强,Z5224的D值最小为0.29,抗旱性最弱;全生育期D值结合单株产量筛选出抗旱且高产的种质Z5205、豫花22、0215A(黑)和花育917。综合各抗旱指标与D值间的灰色关联度分析及相关性分析结果可知,花生苗期根部鲜重和根尖数与D值的关系最为密切,可以作为花生苗期抗旱性鉴定的最优指标;花生全生育期中根系干重、根系长度、根系体积为最佳鉴定指标。建立苗期及全生育期抗旱性预测回归模型,其预测D值与实际D值之间为显著相关,可以对D值进行较好的预测。以D值为自变量,苗期及全生育期地上部相关指标及产量为因变量,建立了6个一元回归方程,其R^2均大于0.5,表明根系在地上部生长及产量形成方面发挥着重要作用。

关键词:花生;抗旱系数;隶属函数;根系
中图分类号:S565.2　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)04-0168-16

Identification and evaluation of drought-resistant peanut germplasm based on root system traits

SHANG Sui-teng[1], YU Bing-jie[2], YU Yue-hua[1*], MIAO Hao-cui[2*], HOU Xian-fei[2], LI Qiang[2], JIA Dong-hai[2], GU Yuan-guo[2], SU Hang[2], YAN Bo[1]
(1. *Agriculture College of Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*; 2. *Crop Research Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region Academy of Agricultural Sciences/ Urumqi Field Comprehensive Observation Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi* 830091, *China*)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of drought stress imposed during the seedling stage and throughout the entire growth period on root growth and development in peanuts, identify drought-resistant cultivars, and determine key indicators for drought resistance evaluation, thereby providing a theoretical foundation for peanut breeding under drought conditions. A total of 103 peanut varieties were used in pot experiments with controlled water supply during the seedling stage and field experiments with regulated irrigation throughout the whole growing season. Eleven root-related traits—including root fresh weight, root dry weight, and root length—were analyzed using correlation analysis, principal component analysis, membership function evaluation, cluster analysis, and grey

收稿日期:2025-12-26
基金项目:新疆农业科学院农业科技创新稳定支持专项(xinkywdzc-2023001-27);新疆维吾尔自治区油料产业技术体系(XARS-05)
作者简介:尚随腾(2000-),男,硕士,研究方向为花生抗旱性鉴定,E-mail: 3298551353@qq.com
* 通讯作者:于月华(1981-),女,教授,硕士生导师,主要从事作物抗逆分子育种,E-mail: yuyuehua1213@sina.com;
苗昊翠(1981-),女,研究员,主要从事花生栽培与育种,E-mail: mc09876@163.com

relational grade analysis. A comprehensive assessment of drought tolerance across genotypes was conducted, and optimal indicators for drought resistance identification were selected. Results indicated that drought stress significantly inhibited multiple root traits such as root fresh and dry weights, whereas physiological ratios including root-to-shoot ratio and dry-to-fresh weight ratio increased under stress conditions. Most root traits exhibited significant or highly significant correlations across growth stages. Based on the D-value index, cluster analysis classified the 103 peanut accessions into five categories—Category I (extremely drought-sensitive), Category II (strongly drought-sensitive), Category III (moderately drought-sensitive), Category IV (moderately drought-resistant), and Category V (strongly drought-resistant)—both at the seedling stage and over the full growth period. At the seedling stage, Category I accounted for 1.90% of the total, while Category V represented 17.47%. Jizhong 5059 exhibited the highest D value (0.87), indicating superior drought tolerance among tested varieties, whereas Z5235 had the lowest D value and was classified as extremely drought-sensitive. Over the entire growth period, Category I comprised 23.33% of the total, and Category V accounted for 3.80%. GH01464 showed the highest D value (0.70), demonstrating the strongest drought resistance, while Z5224 had the lowest D value (0.29), indicating the weakest performance. By integrating D values with single-plant yield data, four high-yielding and drought-tolerant varieties were identified: Z5205, Yufa 22, 0215A (black), and Huayu 917. Grey relational analysis and correlation results revealed that root fresh weight and root tip number exhibited the closest association with the D value at the seedling stage, suggesting their suitability as primary selection criteria; for the whole growth period, root dry weight, root length, and root volume were determined to be the most effective indicators. Regression models for predicting drought resistance at both developmental stages were established, with predicted D values showing significant correlation with observed values, enabling reliable estimation. Six linear regression equations were developed using the D value as the independent variable and aboveground traits and yield as dependent variables, all yielding R^2 values exceeding 0.5, which underscores the critical role of root system development in supporting shoot growth and yield formation. This study established a comprehensive evaluation system for peanut drought resistance based on root morphological and physiological traits across growth stages, identified elite drought-tolerant varieties, and provided both theoretical support and germplasm resources for drought-resilient peanut breeding and variety selection in arid environments.

Key words: peanut; drought resistance coefficient; membership function; root system

花生(*Arachis hypogaea* L.)是我国最重要的油料作物之一,其总产量稳居油料作物之首[1],单产也接近于油菜和大豆的两倍[2]。近年来新疆花生种植面积日益增加,由2000年的5万亩增长至2022年的25万亩,平均亩产高达500 kg,约是其他地区的两倍[3]。然而,在新疆花生产业发展向好的整体背景下,水资源短缺已成为制约新疆花生产业可持续发展的突出问题。作物在生育期内若遭受持续性干旱胁迫,轻则抑制生长发育、降低品质[4-7],重则导致植株死亡,造成绝收[8]。新疆属温带大陆性气候,年均降水量多低于200 mm。天然降水稀少与农业用水配额不足,使水资源短缺成为制约新疆花生产量、品质及产业可持续发展的主要因素。因此,对不同花生种质抗旱能力进行评价,筛选节水型花生品种对新疆花生产业发展具有重要意义。

前人对花生抗旱性评价与鉴定方面的研究已有较多报道,主要针对某单一时期结合多个鉴定指标通过主成分分析、隶属函数分析、聚类分析等方法对供试品种进行评价,以避免单一指标或者是单一鉴定方法造成的结果不稳定性。金欣欣[9]等和艾鑫[10]等,通过全生育期田间抗旱试验模式,以产量和品质性状等相关指标,结合主成分分析、隶属函数分析、灰色关联度分析、聚类分析等对供试花生品种依次进行分类,鉴定抗旱种质。曹凤岩[11]等和刘永惠[12]等,通过室内苗期及萌发期干旱胁迫的方式,测定相关指标,并通过主成分分析、隶属函数分析等方法鉴定抗旱种质。万丽云[13]等对10个花生材料在苗期进行干旱-复水试验,通过调查平均存活率和根冠比相关指标,将供试品种分为抗旱、中抗和干旱敏感3个类型,为抗旱种质资源的筛选工作提供了新的研究思路。

花生的根系是吸收水和养分的主要营养器官,与作物的抗旱性密切相关[14],根系在花生苗期奠定抗旱基础,保障幼苗生长与胁迫耐受;开花下针期支

撑花器发育与下针进程,减少干旱导致的落花落针;结荚期持续供给水肥,保障荚果灌浆与干物质积累,其作用贯穿全生育期始终,尤其新疆地区干燥少雨,根系功能尤为关键。以往针对花生耐旱的研究多集中于农艺、生理、光合[15,16]等多维度指标进行抗旱性综合评价,而仅以花生根系分析花生耐旱性的研究较少。本研究结合花生苗期、全生育期干旱对根系的影响,运用主成分分析、隶属函数分析、聚类分析等多种方法对103份花生种质进行综合抗旱性分析,以此探究干旱胁迫对花生根系生长发育的影响,并为花生抗旱种质资源的筛选及不同时期抗旱性鉴定评价方法的优化提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 材料

材料为新疆维吾尔自治区农业科学院作物研究所搜集和保存的103份品种(系)材料(表1)。

1.2 试验设计

表1 本试验所用花生种质资源

Table 1 Peanut germplasm resources used in this experiment

编号 Accession	品种名称 Cultivar	编号 Accession	品种名称 Cultivar	编号 Accession	品种名称 Cultivar
1	C095	36	冀0917-001 Ji 0917-001	71	GH01605
2	Z5070	37	GH01453	72	豫花102 Yuhua 102
3	C016	38	GH01436	73	冀花4号 Jihua 4
4	C129	39	豫花37 Yuhua 37	74	0215A(黑) 0215A(Hei)
5	Z5083	40	GH01407	75	云南引花(红小粒) Yunnan Yinhuasheng (Hong Xiaoli)
6	Z5184	41	GH01412	76	GH01651
7	Z5205	42	GH01633	77	开农37 Kainong 37
8	新会小粒 Xinhui xiaoli	43	赣花1号 Ganhua 1	78	天府9号 Tianfu 9
9	Z5152	44	海粤盛02 Haiyusheng 02	79	花育33 Huayu 33
10	Z5168	45	山花18号 Shanhua 18	80	HZ-224
11	航花2号 Hanghua 2	46	冀花16号 Jihua 16	81	阜花11 Fuhua 11
12	Z5165	47	GH01464	82	花育917 Huayu 917
13	Z5224	48	GH01648	83	开农黑花生 Kainonghei huasheng
14	Z5160	49	GH01465	84	白沙1016 Baisha 1016
15	开农1715 Kainong 1715	50	中花412 Zhonghua 412	85	潍花8号 Weihua 8
16	Z5235	51	远杂6号 Yuanza 6	86	海花1号 Haihua 1
17	C133	52	吉花23 Jihua 23	87	黑珍珠 Heizhenzhu
18	Z5164	53	GH01408	88	红一号 Hongyihao
19	C006	54	赣花7号 Ganhua 7	89	豫花9327 Yuhua 9327
20	Z5176	55	长粒花生 Changli huasheng	90	花育20 Huayu 20
21	Z5173	56	四粒红 Silihong	91	中花16号 Zhonghua 16
22	Z5175	57	湛油75 Zhanyou 75	92	NCK-16940
23	X-5(Y5)	58	黔兴红1号 Qianxinghong 1	93	花育52号 Huayu 52
24	Z5172	59	赣油9号 Ganyou 9	94	山花9号 Shanhua 9
25	C110	60	冀5059 Ji 5059	95	红沙 Hongsha
26	冀农花12号 Jinonghua 12	61	远杂9847 Yuanza 9847	96	冀花8号 Jihua 8
27	湛油16号 Zhanyou 16	62	豫花22 Yuhua 22	97	湛红2号 Zhanhong 2
28	三里湾黑花生 Sanliwan heihuasheng	63	濮花9号 Puhua 9	98	花育960 Huayu 960
29	Z5157-1(浅红) Z5157-1 (Qianhong)	64	甜红花生 Tianhong huasheng	99	潍花28 Weihua 28
30	花育36号 Huayu 36	65	湛油2号 Zhanyou 2	100	豫花9847 Yuhua 9847
31	泉花17 Quanhua 17	66	贺油13 Heyou 13	101	山花7号 Shanhua 7
32	远杂9102 Yuanza 9102	67	琼科花18 Qiongkehua 18	102	豫花9326 Yuhua 9326
33	1803	68	花育905 Hhuayu 905	103	花育28 Huayu 28
34	花育9120 Huayu 9120	69	GH01608		
35	潍花25 Weihua 25	70	GH01462		

1.2.1 苗期耐旱试验 试验于人工智能光照培养室(温度28℃;湿度32%)内进行盆栽。干旱处理前,将所有盆重统一调整至105~110 g(土壤含水率65%~70%)。幼苗三叶期时,对干旱胁迫(T)停止浇水7 d(土壤含水率10%~15%),对照组(CK)正常浇水,设置3个重复。干旱胁迫结束后复水,并于复水后第7 d测定植株根系指标。

1.2.2 全生育期耐旱试验 分别于2024、2025连续两年于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市新市区安宁渠镇自治区农业科学院乌鲁木齐试验站(北纬43°57′,东经87°29′)开展103份花生种质资源全生育期耐旱性鉴选试验,土壤类型为灰漠土,2024年播种时间为5月2日,2025年播种时间为4月30日,两年的收获时间分别为9月17日和9月20日。灌溉方式为膜下滴灌,一膜四行两带,单粒播种。试验设置对照组(CK、总灌水量为3037.8 m^3/hm^2)和干旱胁迫(D、总灌水量为1768.2 m^3/hm^2)两种处理,为保证正常出苗第一次灌水两处理均滴水378.6 m^3 hm^{-2},后续每次灌水,对照组水量为332.4 m^3/hm^2,干旱胁迫为173.7 m^3/hm^2,全生育期共灌水9次,采用水表进行灌水总量控制,两年土壤含水率见表2,对照组及抗旱组进行独立T样本分析,结果表明两年数据均$P<0.01$,即2024和2025年度对照组及抗旱组土壤含水率存在显著差异。每个材料种植四行,行长3 m,株距10 cm,小区面积4.35×10^{-4} hm^2,3次重复。

1.3 指标测定

1.3.1 室内试验指标测定 (1)表型指标:复水7 d后随机取不同处理的各3株幼苗,3次重复,吸干表面水分后,测定每株幼苗的株高、地上部鲜重根部鲜重,然后放入到烘箱内烘干至恒重,并称量根部干重,同时统计复水7 d后的复水存活率。

(2)根系扫描指标:用中晶ScanMaker i800 PLUS型号根扫仪对其中的五株幼苗进行根系扫描,测定根系长度、根系平均直径、根系体积、根系表面积、根尖数。

(3)根据计算所得指标:

干鲜比(Dry-fresh ratio)= 根系干重/根系鲜重

根冠比(Root-shoot ratio)= 根系鲜重/地上部鲜重

根密度(Root density)= 根系干重/根系体积

比根长(Specific root length)= 根系长度/根系干重

1.3.2 大田试验指标测定 于每年度收获前选取各处理长势一致的花生植株3株,测定根系鲜重,放入烘箱105℃烘2 h杀青,后将烘箱调至80℃烘干至恒重,测定根系干重。测定株高、地上部鲜重、单株产量。其余测定指标同室内试验一致。

1.4 数据处理与分析

采用2024-2025年田间试验测定数据均值进行数据分析。采用Microsoft Excel 2019进行数据统计及其处理,采用SPSS(26),Rstudio(4.4.2)相关软件进行相关性分析、主成分分析、聚类分析等。

$$DC = Ti/CKi \tag{1}$$

$$CDC = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{DC} \tag{2}$$

$$u(xj) = \frac{(x_j - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \tag{3}$$

$$w_j = \frac{p_j}{\sum_{j=1}^{n} p_j}, j = 1,2,\ldots,n \tag{4}$$

$$D = \sum_{j=1}^{n}[u(xj) \times w_j]\, i = 1,2,\ldots n;\ j = 1,2,\ldots,n \tag{5}$$

表2 2024-2025年度不同阶段田间土壤含水率

Table 2 Field soil moisture content at different stages during 2024-2025 /%

灌水 Irrigation		第1次 1st	第2次 2nd	第3次 3rd	第4次 4th	第5次 5th	第6次 6th	第7次 7th	第8次 8th	第9次 9th
2024	CK	21	18	15	17	16	17	21	17	21
	T	21	11	6	9	7	9	13	11	13
2025	CK	24	21	20	22	19	24	26	25	20
	T	24	12	9	12	12	10	12	12	8

注:CK和T分别代表正常灌水处理和干旱处理。2024年度第1次至第9次的灌水时间依次为:5月6日、6月12日、6月27日、7月11日、7月23日、8月3日、8月14日、8月22日、9月3日;2025年度第1次至第9次的灌水时间依次为:5月2日、6月9日、6月17日、7月11日、7月20日、7月29日、8月8日、8月21日、9月4日

Note: CK and T represent the normal irrigation treatment and drought treatment, respectively. The first to the ninth irrigation dates in 2024 are May 6th, June 12th, June 27th, July 11th, July 23rd, August 3rd, August 14th, August 22nd, and September 3rd, respectively. The first to the ninth irrigation dates in 2025 are May 2nd, June 9th, June 17th, July 11th, July 20th, July 29th, August 8th, August 21st, and September 4th, respectively

$$\omega i(\gamma) = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^{n}\gamma_i} \quad (6)$$

$$WDC = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{DC} \times \omega i(\gamma) \quad (7)$$

公式(1)和(2)中,DC表示各个指标的抗旱系数,CDC则表示综合抗旱系数,T_i和CK_i分别表示干旱处理组和对照组下第i个指标的测定值;公式(3)-(5)中,对各项指标抗旱系数进行主成分分析,将单一指标降维为j个综合指标,x_j、x_{max}和x_{min}分别表示第j个综合指标的测定值,及第j个综合指标中的最大值、最小值。p_j表示经主成分分析所得的各个花生品种的第j个综合指标的贡献率,w_j表示第j个综合指标在所有综合指标中的权重。D为各个花生品种在干旱胁迫条件下,由综合指标评价所得的抗旱性综合评价值。以各个指标的DC值为比较系列,以D值为参考系列进行灰色关联度分析,获得各指标DC值与D值之间的关联度(γ_i)。按照公式(6)和(7)分别来计算各个指标的权重系数$\omega i(y)$和加权抗旱系数(WDC)。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对花生根系性状的影响

表3结果表明,干旱胁迫会影响花生苗期根系的生长发育。干旱处理下根系鲜重、干重等8项测定指标均值均出现下降,降幅为1.54%~46.35%。其中,根系鲜重降幅最大(46.35%),根系干重、体积和表面积降幅均高于40.00%,说明水分亏缺严重抑制根系生物量的积累和形态形成,具体表现为根系生长受阻、体积及表面积减小、干物质积累受阻。与此相反,干旱胁迫促使根冠比增加,增幅为26.32%,表明植株可能通过优化资源分配策略,将水分和养分优先供给根系以维持其生存功能,从而相对抑制了地上部生长。

由表4可知,相较于苗期,全生育期干旱胁迫对花生根系生长的影响程度较轻。根干鲜重、根系长度、根系平均直径、根系体积、根尖数均较对照有所下降,降幅介于13.48%至26.41%之间。其中,根系表面积降幅最大(26.41%),根系鲜重和干重分别下降18.00%和17.50%,较苗期根系干鲜重降幅

表3 干旱胁迫下花生苗期根系性状的变化

Table 3 Changes in root traits of peanut seedlings under drought stress

指标 Index	处理 Treatment	平均值 Mean	变化幅度 Magnitude of change /%	最大值 Max	最小值 Min	标准差 SD	变异系数 CV /%
根鲜重 /g	CK	2.33	−46.35	4.1	0.8	0.68	29
Fresh root weight	T	1.25		3.5	0.06	0.83	66
根干重 /g	CK	0.30	−43.33	0.97	0.09	0.15	50
Dry root weight	T	0.17		0.8	0.01	0.13	76
根系长度 /cm	CK	68.13	−37.40	126.35	32.07	20.45	30
Root length	T	42.65		96.71	7.08	21.68	51
根系平均直径 /cm	CK	0.65	−1.54	0.89	0.37	0.09	14
Mean root diameter	T	0.64		3.52	0.42	0.31	45
根系体积 /cm^3	CK	3.99	−42.11	9.25	1.55	1.33	33
Root volume	T	2.31		4.67	0.44	1.06	46
根系表面积 /cm^2	CK	140.45	−41.08	264.45	59.54	39.68	28
Root surface area	T	82.76		175.64	14.52	39.79	48
根尖数	CK	638.00	−28.53	1310	334	20.06	31
Number of apex	T	456.000		1122	84	21.59	47
干鲜比	CK	0.13	+23.08	0.37	0.06	0.06	49
Dry-fresh ratio	T	0.16		0.53	0.04	0.09	60
根冠比	CK	0.57	+26.32	1.01	0.29	0.15	26
Root-shoot ratio	T	0.72		1.79	0.13	0.31	44
根密度 /(g/cm^3)	CK	0.083	−3.75	0.38	0.03	0.06	70
Root density	T	0.080		0.25	0	0.05	65
比根长 /(cm/g)	CK	277.76	+113.64	965.84	39.62	141.32	51
Specific root length	T	593.40		10718.55	33.63	1291.07	218

注:"+"和"-"分别代表干旱处理相较于对照的各指标上升及下降情况,下同

Note: "+" and "-" respectively represent the increase and decrease of each index in the drought treatment compared with the control; Same as below

低。此外,全生育期各指标的变异系数均显著低于苗期,种质间的差异较小,表现相对稳定。

2.2 花生根系性状抗旱系数差异分析

利用表型数据计算抗旱系数是评估作物抗旱性的重要方法。由表5、表6可知,苗期根系性状抗旱系数均值范围为0.54~1.74,其中比根长最高(1.74),根系鲜重最低(0.54);全生育期抗旱系数均值范围为0.77~1.14,根冠比最高(1.14),根系表面积最低(0.77)。值得注意的是,根冠比在苗期和全生育期抗旱系数分别为1.32和1.14,表明干旱胁迫下花生倾向于将更多同化产物分配至根系,通过调节生物量分配以适应水分胁迫的生理策略。

不同指标抗旱系数的变异系数揭示了不同花生种质对干旱响应的离散程度,变异系数越大,种质间差异越大,干旱敏感性越高。本研究中,苗期表现为比根长的变异系数最大(1.49),根系平均直径的变异系数最小(0.18);全生育期则为根系鲜重的变异系数最大(0.34),干鲜比最小(0.12)。综上,不同生育时期干旱胁迫对花生根系各指标的影响不同。

2.3 花生根系性状抗旱系数相关性分析

苗期抗旱系数的相关性分析结果表明,多个指标均存在显著或极显著相关。根系鲜重与根系干重、长度、体积、表面积、根尖数、根密度呈极显著正相关($P<0.01$),与根系平均直径呈显著正相关($P<0.05$),与干鲜比及比根长呈显著负相关($P<0.05$)。根系干重的相关性结果与根系鲜重相似度较高,除干鲜比及与比根长为极显著负相关外($P<0.01$),其余关联方向与显著性水平均相同。根冠比除与根密度极显著正相关($P<0.01$)外,与其他指标均呈极显著负相关或无显著相关。根系长度和根系表面积的相关性系数最高(0.93),根系鲜重与根系干重次之,相关性系数为0.87(图1A)。

全生育期抗旱系数的相关性分析结果表明,根系鲜重与根系干重、长度、体积、表面积、根尖数、根冠比呈极显著正相关($P<0.01$),而与其他指标无显著相关。根系干重除与上述指标呈极显著正相关外,并与干鲜比及根密度呈显著正相关($P<0.05$),与比根长呈显著负相关($P<0.05$)。根冠比与根系长度、根系体积、根系表面积呈极显著正相关($P<0.01$),与根尖数呈显著正相关($P<0.05$),而与干鲜比及根密度呈显著负相关($P<0.05$)。根系平均直径与其他指标均无显著相关。全生育期根系表面

表4 干旱胁迫下花生全生育期根系性状的变化

Table 4 Changes in root traits of peanut throughout the whole growth period under drought stress

指标 Index	处理 Treatment	平均值 Mean	变化幅度 magnitude of change /%	最大值 Max	最小值 Min	标准差 SD	变异系数 CV /%
根鲜重 /g	CK	5.00	−18.00	9.84	2.58	1.39	28
Fresh root weight	T	4.10		7.40	1.13	1.18	29
根干重 /g	CK	2.00	−17.50	4.84	0.83	0.65	32
Dry root weight	T	1.65		3.17	0.50	0.50	30
根系长度 /cm	CK	22.84	−24.74	46.34	11.67	6.24	27
Root length	T	17.19		31.98	5.31	4.99	29
根系平均直径 /cm	CK	0.89	−13.48	1.11	0.68	0.10	11
Mean root diameter	T	0.77		0.93	0.63	0.06	8
根系体积 /cm^3	CK	1.82	−17.58	3.87	0.86	0.51	28
Root volume	T	1.50		2.89	0.44	0.46	31
根系表面积 /cm^2	CK	51.83	−26.41	107.95	27.16	14.24	27
Root surface area	T	38.14		71.88	11.28	11.51	30
根尖数	CK	436.00	−23.62	844.00	199.25	132.33	30
Number of apex	T	333.00		732.17	88.67	110.31	33
干鲜比	CK	0.40	+0.50	0.63	0.31	0.05	11
Dry-fresh ratio	T	0.41		0.55	0.32	0.04	11
根冠比	CK	0.03	+6.67	0.08	0.01	0.01	40
Root-shoot ratio	T	0.03		0.10	0.01	0.01	38
根密度 /(g/cm^3)	CK	1.10	+0.75%	1.63	0.76	0.16	14
Root density	T	1.11		1.62	0.91	0.13	12
比根长 /(cm/g)	CK	12.60	−16.74	16.83	10.44	1.03	8
Specific root length	T	10.49		12.68	6.51	1.13	11

表5 苗期不同根系性状抗旱系数分析

Table 5 Drought resistance coefficients of different root traits at seedling stage

指标 Index	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 SD	变异系数 CV /%
根部鲜重 Fresh root weight	0.54	1.58	0.04	0.34	63
根部干重 Dry root weight	0.6	1.77	0.03	0.36	60
根系长度 Root length	0.63	1.33	0.16	0.28	44
根系平均直径 Mean root diameter	1.01	1.86	0.71	0.18	18
根系体积 Root volume	0.62	1.69	0.12	0.32	51
根系表面积 Root surface area	0.61	1.22	0.11	0.27	45
根尖数 Number of apex	0.71	1.36	0.19	0.25	35
干鲜比 Dry-fresh ratio	1.23	3.67	0.4	0.5	41
根冠比 Root-shoot ratio	1.32	3.08	0.25	0.59	45
根密度 Root density	1.05	2.55	0.04	0.55	52
比根长 Specific root length	1.74	22.22	0.31	2.6	149

表6 全生育期不同根系性状抗旱系数分析

Table 6 Drought resistance coefficients of different root traits throughout the whole growth period

指标 Index	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 SD	变异系数 CV /%
根部鲜重 Fresh root weight	0.86	1.63	0.28	0.27	34
根部干重 Dry root weight	0.87	1.72	0.35	0.29	33
根系长度 Root length	0.78	1.47	0.34	0.25	31
根系平均直径 Mean root diameter	0.87	1.2	0.59	0.11	13
根系体积 Root volume	0.86	1.57	0.37	0.27	31
根系表面积 Root surface area	0.77	1.56	0.34	0.25	33
根尖数 Number of apex	0.77	1.41	0.45	0.16	21
干鲜比 Dry-fresh ratio	1.02	1.53	0.6	0.13	12
根冠比 Root-shoot ratio	1.14	2.3	0.29	0.37	32
根密度 Root density	1.03	1.88	0.67	0.19	18
比根长 Specific root length	0.84	1.09	0.55	0.11	13

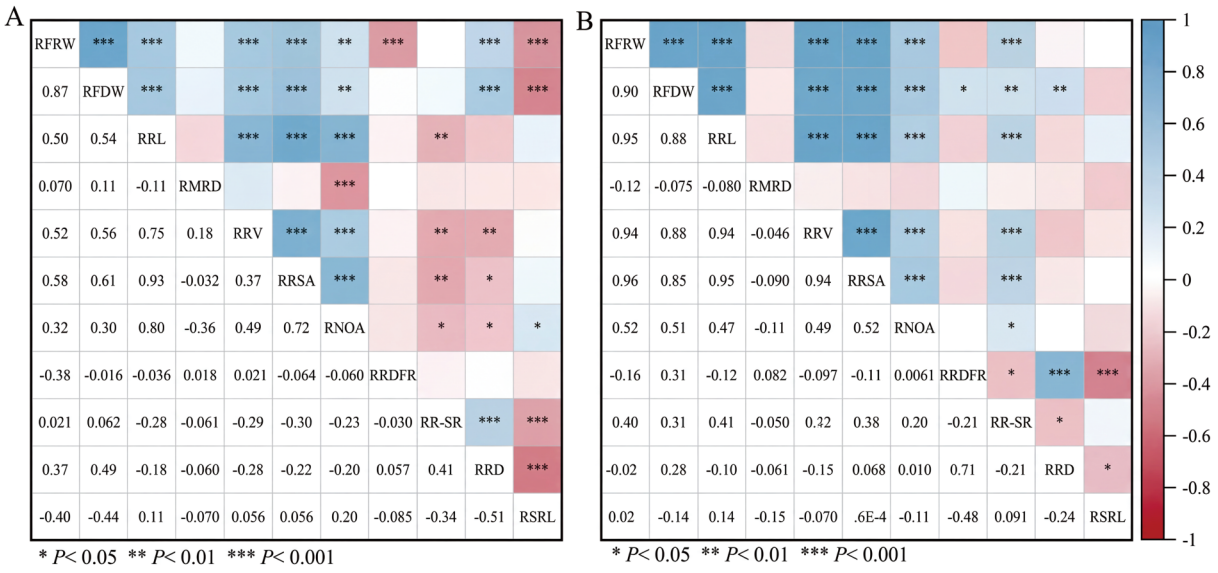
积与鲜重的相关性最强(r = 0.96),其次为根系长度与根系表面积(r= 0.95,图1B)。

综上所述,不同生育时期干旱胁迫对供试品种各指标的影响程度并不相同,各时期所测的11个指标中存在较多显著相关,由此可见,花生的抗旱性并非由单一指标决定,而是多个指标共同作用的结果。因此,抗旱性的科学鉴定与评价必须依靠多指标综合分析。

2.4 干旱胁迫下花生根系性状主成分分析

为了综合评价各抗旱指标,本研究对苗期、全生育期相关性状分别进行了主成分分析。苗期分析共提取4个主成分(表7),累计贡献率为83.53%。第一主成分(PC1)的特征值为4.23,贡献率为38.51%,其中根系长度和根系表面积的载荷系数均高于0.9,主要表征花生根系生长。第二主成分(PC2)的特征值为2.53,贡献率为23.08%,根部干重(0.61)和根部鲜重(0.56)、根冠比(0.57)、根密度(0.85)的载荷系数较高,主要反映花生综合生物量。第三主成分(PC3)的特征值为1.29,贡献率为11.79%,根系平均直径的载荷系数最高为0.93,主要体现花生根系的横向生长。第四主成分(PC4)的特征值为1.16,贡献率为10.14%主要由干鲜比主导(载荷系数0.98),且多数指标对其呈正向影响。

全生育期分析共提取3个主成分,累计贡献率为76.96%。由表8可知,PC1特征值为5.21,贡献率为47.36%,根系鲜重(0.98)、干重(0.91)、长度(0.97)、体积(0.97)、表面积(0.97)载荷系数较高,主要表征花生根系生长和生物量。PC2特征和为2.16,贡献率为19.71%,干鲜比(0.91)、根密度(0.85)载荷系数较高,主要反映花生根系生长和生物量。PC3特征值为1.088,贡献率为9.89%,根系



注:A:苗期;B:全生育期;RFRW:相对根系鲜重;RFDW:相对根系干重;RRL:相对根系长度;RMRD:相对根系平均直径;RRV:相对根系体积;RRSA:相对根系表面积;RNOA:相对根尖数;RRDFR:相对根系干鲜比;RR-SR:相对根冠比;RRD:相对根密度;RSRL:相对比根长;*:$P<0.05$;**:$P<0.01$;***:$P<0.001$

Note: A: seedling stage; B: whole growth period; RFRW: relative fresh root weight; RFDW: relative dry root weight; RRL: relative root length; RMRD: relative mean root diameter; RRV: relative root volume; RRSA: relative root surface area; RNOA: relative number of root tips; RRDFR: relative root dry-fresh ratio; RR-SR: relative root-shoot ratio; RRD: relative root density; RSRL: relative specific root length; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$

图1 不同时期根系性状抗旱系数的相关性分析

Fig. 1 Correlation of drought resistance coefficients of root traits in different periods

表7 苗期花生根系性状抗旱系数的主成分分析

Table 7 Principal component of drought resistance coefficient of peanut root traits at seedling stage

指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4
根部鲜重 Fresh root weight	0.73	0.56	0.06	−0.28
根部干重 Dry root weight	0.73	0.61	0.09	0.10
根系长度 Root length	0.92	−0.19	−0.11	0.10
根系平均直径 Mean root diameter	−0.03	0.11	0.93	−0.04
根系体积 Root volume	0.86	−0.14	0.30	0.07
根系表面积 Root surface area	0.96	−0.15	0.02	0.06
根尖数 Number of apex	0.74	−0.30	−0.45	0.06
干鲜比 Dry-fresh ratio	−0.14	−0.05	0.06	0.98
根冠比 Root-shoot ratio	−0.28	0.57	−0.27	−0.04
根密度 Root density	−0.07	0.85	−0.21	0.11
比根长 Specific root length	−0.03	−0.80	−0.05	−0.17
特征值 Eigenvalue	4.23	2.53	1.29	1.16
贡献率 Contribution rate	38.51	23.08	11.79	10.14
累计贡献率 Cumulative contribution rate	38.51	61.59	73.97	83.53

平均直径(0.89)载荷系数较高,主要表征花生根系的横向生长。

2.5 花生抗旱性的综合性评价及聚类分析

综合评价值(D值)是评估作物抗旱性的关键指标,其数值越高,表明品种的抗旱性越强。本研究通过主成分分析结合隶属函数法计算得出各供试品种D值,并以D值为依据对103份花生种质进行聚类分析,按D值由低至高排序,苗期与全生育期均将其划分为五类:Ⅰ类(极度干旱敏感型)、Ⅱ类(强干旱敏感型)、Ⅲ类(中度干旱敏感型)、Ⅳ类(中度抗旱型)和Ⅴ类(强抗旱型)。

苗期聚类结果(图2A)表明,Ⅰ类仅有2个品种

表8 全生育期花生根系性状抗旱系数的主成分分析

Table 8 Principal component analysis of drought resistance coefficient of peanut root traits throughout the whole growth period

指标 Index	PC1	PC2	PC3
根部鲜重 Fresh root weight	0.98	−0.01	−0.02
根部干重 Dry root weight	0.91	0.36	−0.05
根系长度 Root length	0.97	−0.07	−0.01
根系平均直径 Mean root diameter	−0.12	0.09	0.89
根系体积 Root volume	0.97	−0.03	0.13
根系表面积 Root surface area	0.97	0.00	0.02
根尖数 Number of apex	0.60	0.13	−0.05
干鲜比 Dry-fresh ratio	−0.10	0.91	−0.02
根冠比 Root-shoot ratio	0.48	−0.29	0.11
根密度 Root density	−0.07	0.83	−0.32
比根长 Specific root length	0.00	−0.64	−0.41
特征值 Eigenvalue	5.21	2.17	1.09
贡献率 Contribution rate	47.36	19.71	9.89
累计贡献率 Cumulative contribution rate	47.36	67.07	76.96

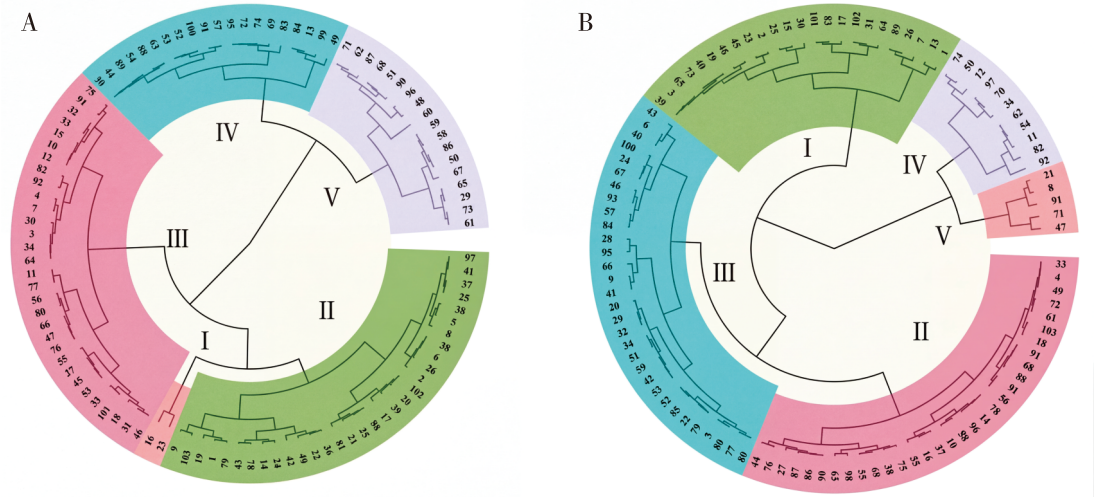
占比最小,仅占总数的1.90%,Ⅴ类有18个品种,占总数的17.47%。冀5059的D值最大(0.87),Z5235的D值最小仅为0.27。全生育期聚类结果(图2B)表明,Ⅰ类有24个品种,占总数的23.33%,Ⅴ类有5个,占总数的3.80%,GH01464 D值最大为0.70,Z5224 D值最小为0.29。

基于苗期与全生育期聚类结果,将Ⅴ类及Ⅳ类归类为抗旱种质,将Ⅰ类及Ⅱ类归类为敏感种质绘制韦恩图(图3)。鉴定出中花412、赣花7号、豫花22、GH01462、GH01605、0215A(黑)6个品种在苗期及全生育期表现均为抗旱型,C095、Z5070、C133、X-5(Y5)、C110等19个在苗期及全生育期表现为敏感型的花生种质。

同时全生育期D值(大于0.55)结合单株产量(大于126 g),筛选出Z5205、豫花22、0215A(黑)、花育917四个抗旱且高产种质。

2.6 花生耐旱性指标灰色关联度分析及相关性分析

各表型指标的耐旱系数DC与综合评价值D进行灰色关联度分析,其关联度的大小直接反映了指标DC值与D值之间的关系密切程度。苗期干旱胁



注:A:花生苗期聚类;B:全生育期聚类

Note: A: clustering results of peanut seedlings; B: clustering results throughout the whole growth period

图2 不同时期各花生品种基于D值的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of peanut varieties based on D value in different periods

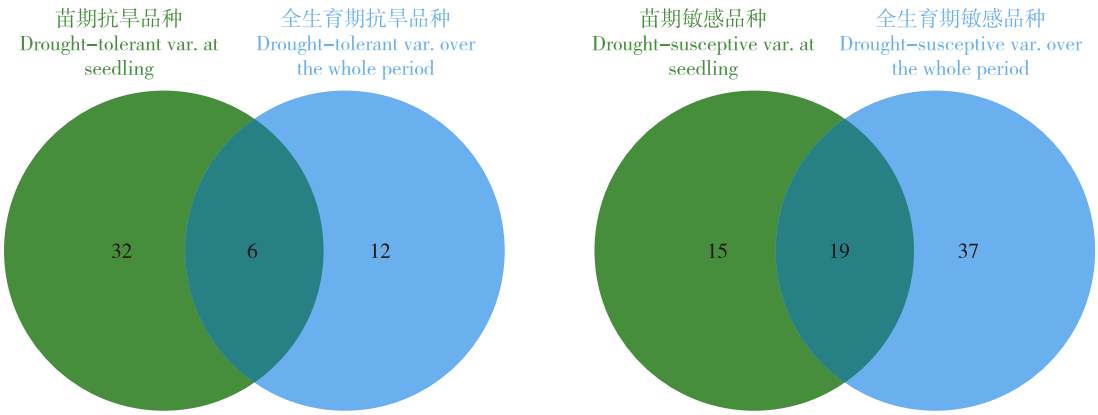


图3 苗期及全生育期抗旱及敏感品种差异分析

Fig. 3 Differences in drought-tolerant and sensitive varieties of peanut at seedling stage and throughout the whole growth period

迫下,各指标与D值的关联度依次为:根尖数(0.93)>根部鲜重(0.91)= 根系平均直径(0.91)>根密度(0.89)>根冠比(0.86)>比根长(0.84)>根系表面积(0.83)> 根系体积(0.82)>干鲜比(0.80)>根系长度(0.85)>根部干重(0.70)。其中,根尖数、根部鲜重和根系平均直径与D值的关联度均大于0.90,表明这些指标在苗期抗旱性评价中具有重要参考价值。全生育期干旱胁迫下,各指标与D值的关联度依次为:根系长度(0.86)>根尖数(0.81)>根冠比(0.80)>根部干重(0.79)= 根系体积(0.79)>根部鲜重(0.73)>根密度(0.68)>干鲜比(0.67)= 比根长(0.67)>根系平均直径(0.64)>根系表面积(0.63)。根系长度、根尖数和根冠比的关联度均高于0.80,提示其为全生育期抗旱性鉴定的关键指标。

相关性分析结果进一步验证了上述关联特征(图4)。苗期中,除比根长与D值呈显著负相关外,根系鲜重、干重、长度、平均直径、体积、表面积和根尖数均与D值呈显著正相关(P <0.05),可作为苗期抗旱性鉴定指标。全生育期中,根系鲜重、干重、长度、体积、表面积、根尖数和根冠比均与D值显著正相关(P<0.05),适用于该时期的抗旱性评价。

两个生育期所筛选出的抗旱性指标基本一致,但其相关系数存在差异。例如,根系干重与D值的相关性在苗期和全生育期分别为0.85和0.86,差异较小;而根系鲜重与D值的相关性表现为苗期0.82、全生育期0.96,根系长度与D值的相关性则为苗期0.78、全生育期0.95。

2.7 基于根系性状的花生抗旱性综合评价模型构建

在苗期和全生育期,分别以D值、WDC值和CDC值为因变量,以11个根系性状指标的耐旱系数(DC值,记为X_1至X_{11})为自变量,X_1至X_{11}分别表示根部干重、根系表面积、比根长、根冠比、根体积、根鲜重、根系长度、根系平均直径、根尖数、干鲜比、根密度,进行逐步回归分析并建立回归模型。结果表明(表9、10),两个生育期的6个模型决定系数(R^2)均大于0.95,且P值均小于0.01,说明模型拟合效果良好,可用于花生抗旱性的综合评价。D值、WDC值与CDC值之间均呈现极显著相关。

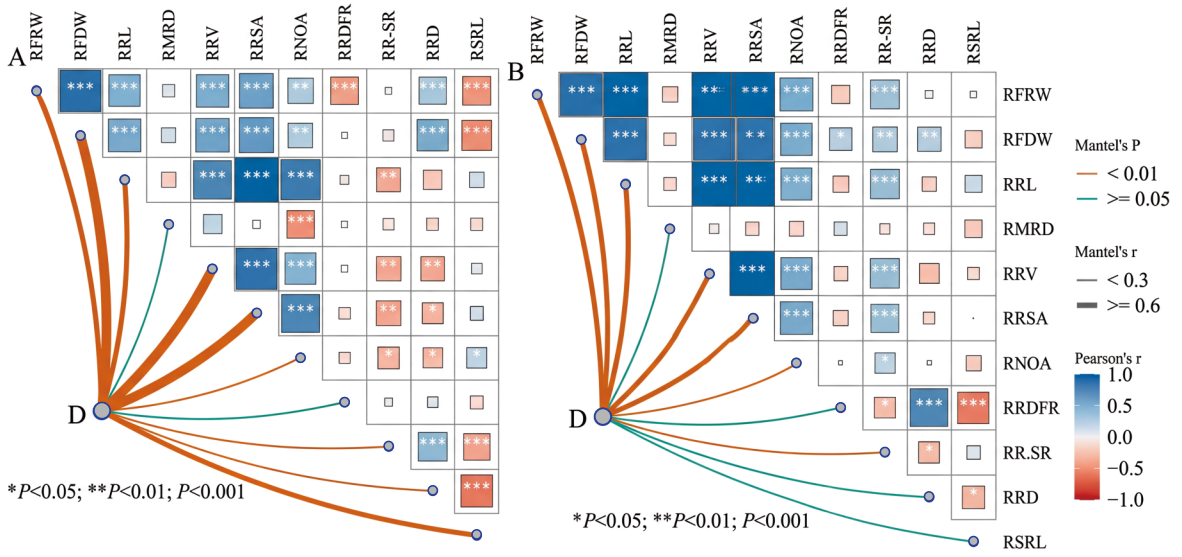
基于D值与各指标DC值构建的抗旱回归方程中,苗期模型包含了全部11个指标,而全生育期模型中未包含干鲜比指标。进一步利用所建模型对D值进行预测,并将预测值与实际D值进行相关性分析,结果显示两者在P<0.01水平上呈极显著相关,表明苗期和全生育期所建立的回归模型均能有效预测花生的抗旱能力,可用于供试品种两个时期抗旱性的早期综合评价。

2.8 根系抗旱特性对花生生长及产量的调控作用

以苗期抗旱试验D值为自变量,分析其与相对株高、相对地上部鲜重及复水恢复能力的关联,结果显示3个线性回归方程的R^2均大于0.6,拟合良好,D值与3个指标间均存在显著关联(图5),表明了苗期干旱胁迫后花生根系的抗旱能力会直接影响地上部的生长及复水后的存活状况,进一步体现了根系在干旱胁迫下的核心作用。

全生育期抗旱试验D值与相对株高、相对地上部鲜重、相对单株产量的线性回归方程中R^2均大于0.5(图6),亦反映了在田间干旱环境下根系抗旱能力强弱与地上部分生长及产量形成密切相关,尤其D值与单株产量的决定系数达到了0.7,说明根系在产量形成过程中起着关键的作用。

综上所述,根系作为干旱环境中水分吸收、养分供应的核心功能器官,无论是在苗期还是全生育期均发挥着重要调控作用。



注:A、B分别表示苗期和全生育期。RFRW:相对根系鲜重;RFDW:相对根系干重;RRL:相对根系长度;RMRD:相对根系平均直径;RRV:相对根系体积;RRSA:相对根系表面积;RNOA:相对根尖数;RRDFR:相对根系干鲜比;RR-SR:相对根冠比;RRD:相对根密度;RSRL:相对比根长;D:综合评价D值

Note: A: seedling period; B: whole growth period; RFRW: relative fresh root weight; RFDW: relative dry root weight; RRL: relative root length; RMRD: relative mean root diameter; RRV: relative root volume; RRSA: relative root surface area; RNOA: relative number of root tips; RRDFR: relative root dry-fresh ratio; RR-SR: relative root-shoot ratio; RRD: relative root density; RSRL: relative specific root length; D: comprehensive evaluation value

图4 不同时期各抗旱指标与D值间的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between various drought resistance indicators and D values in different periods

表9 花生苗期D值、WDC值、CDC值回归方程的建立及相关性分析

Table 9 Establishment of regression equations and correlation analysis for D value, WDC value, and CDC value during the peanut seedling stage

变量 Dependent variable	线性回归方程 Linear regression equation	R^2	相关性分析 Correlation analysis		
			D	WDC	CDC
D值 D value	$Y=0.314+0.087X_1+0.093X_2-0.019X_3+0.040X_4+0.104X_5+0.076X_6+0.081X_7+0.063X_8+0.037X_9+0.009X_{10}-0.009X_{11}$	0.98***		0.57**	0.57**
WDC值 WDC value	$Y=0.064X_1+0.076X_2+0.076X_3+0.078X_4+0.075X_5+0.083X_6+0.078X_7+0.083X_8+0.085X_9+0.074X_{10}+0.081X_{11}$	0.97***			1.00**
CDC值 CDC value	$Y=0.009+0.102X_1+0.091X_3+0.090X_4+0.114X_5+0.097X_6+0.138X_7+0.085X_8+0.095X_9+0.091X_{10}+0.086X_{11}$	0.97***			

注:**:$P<0.01$;***:$P<0.001$;X_1:根部干重;X_2:根系表面积;X_3:比根长;X_4:根冠比;X_5:根体积;X_6:根鲜重;X_7:根系长度;X_8:根系平均直径;X_9:根尖数;X_{10}:干鲜比;X_{11}:根密度。下同

Note: **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$; X_1: root dry weight; X_2: root surface area; X_3: specific root length; X_4: root-shoot ratio; X_5: root volume; X_6: root fresh weight; X_7: root length; X_8: mean root diameter; X_9: number of root tips; X_{10}: dry-fresh ratio; X_{11}: root density. Same as below

3 讨论

3.1 花生根系构型对不同时期干旱胁迫的响应

室内抗旱性鉴定试验因其环境可控性强、操作简便且结果精确度高,已被广泛应用于多种作物的抗旱品种筛选[17-22],而田间试验更贴近农业生产实际环境,其结果具有更好的代表性和真实性。为兼顾两种方法的优势,本研究采用苗期与全生育期相结合的试验模式。

干旱胁迫会延缓作物的生长发育进程,在本研究中干旱胁迫下苗期及全生育期均表现出根系干鲜重、根系长度、根系体系显著下降,这与前人的研究结果一致[10,14],表明干旱胁迫下根系的生长会受到抑制。不同生育阶段根系性状对干旱的响应程度存在一定差异,苗期鉴定中各指标降幅总体大于全生育期,猜测这可能与胁迫处理方式、胁迫强度及植株自身的生存策略有关。首先,苗期为生长关键阶段,对干旱胁迫较为敏感,其次盆栽条件下土壤体积有限、持水量低、失水快,植株面临快速而强

表10 花生全生育期D值、WDC值、CDC值回归方程的建立及相关性分析

Table 10 Establishment of regression equations and correlation analysis for D value, WDC value, and CDC value during the whole growth period of peanuts

变量 Dependent variable	线性回归方程 Linear regression equation	R^2	相关性分析 Correlation analysis	D	WDC	CDC
D	$Y=0.106+0.038X_1+0.154X_2+0.04X_3+0.041X_4+0.04X_5+0.037X_6+0.047X_7-0.013X_8+0.04X_9-0.014X_{11}$	0.98***			0.96**	0.96**
WDC	$Y=0.046+0.104X_1+0.069X_2+0.051X_3+0.073X_4+0.08X_5+0.095X_7+0.056X_8+0.076X_9+0.017X_{10}+0.072X_{11}$	0.97***				1.00**
CDC	$Y=0.063+0.134X_1+0.107X_2+0.076X_3+0.091X_4+0.101X_5+0.112X_7+0.087X_8+0.093X_9+0.03X_{10}+0.104X_{11}$	0.97***				

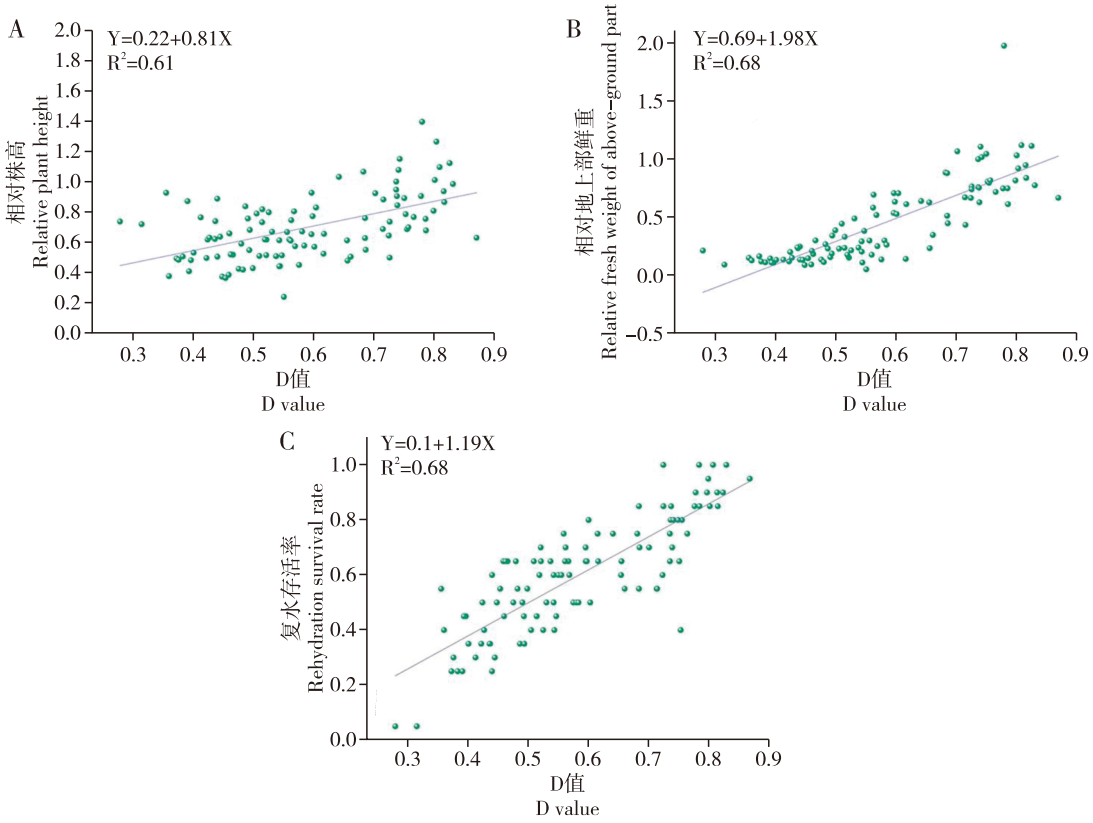


图5 苗期D值与相对株高、相对地上部鲜重及复水存活率关联分析

Fig. 5 Association of D value with relative plant height, relative above-ground fresh weight, and rehydration survival rate at seedling stage

烈的干旱胁迫,属于“急性胁迫”,根系生长受到强烈抑制,从而导致下降幅度增大。相比之下,全生育期试验因在田间环境,土壤体积大、田间持水量递减缓慢,植株经历的是渐进式干旱,植株可通过调整根系构型等适应性反应缓解胁迫,因而性状降幅相对较小。

本研究中苗期干旱胁迫下,抗旱性较强品种具有根尖数多、比根长数值高的特性,表明抗旱性较强的品种会在水分匮乏、土壤持水量低时形成密集须根网络,进而高效捕捉表层土壤残留水分以便更好应对干旱胁迫。在田间全生育期长期、渐进式干旱条件下,D值较高品种具有根体积大、根系总长度更长、根冠比较高的特性,说明在持续的干旱胁迫下,抗旱性强植株会通过调整光合产物的源库分配,将更多同化产物优先供给根系提高根冠比,使其吸收更多的水分来维持生长,这与前人研究结论一致[23-27]。同时干旱还会驱动根系进行纵向深层拓展以吸收深层土的水分,因此D值较高的品种其根

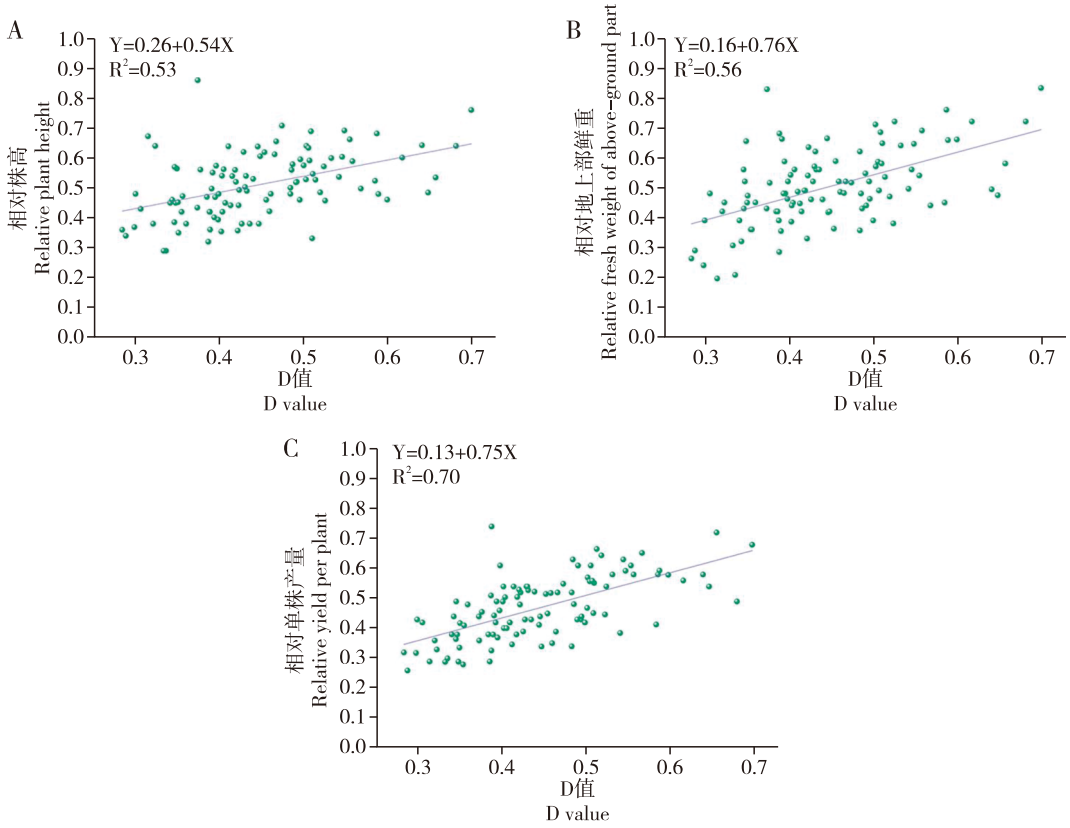


图6 全生育期D值与相对株高、相对地上部鲜重及相对单株产量关联分析

Fig. 6 Association of D value with relative plant height, relative above-ground fresh weight, and relative yield per plant during the whole growth period

长较长,获得深层土壤水分以缓解干旱。而庞大的根系体积会增强其水分运输能力,并为植株提供更强的机械支撑,从而共同构建一个更高效、更稳固的水分吸收与维持体系。

前人在小麦[28]、谷子[29]干旱胁迫下的根系响应研究与本研究高度一致:首先三种作物均体现干旱下根系纵向延伸的策略,花生全生育期高D值品种通过增加根系总长度、小麦依赖深层土壤根长密度提升、谷子凭借“深根系构型”,共同实现对深层土壤水分的高效利用;其次,花生苗期抗旱品种通过提升根尖数、小麦通过增加根毛数量扩大接触面积、谷子则以干鲜比提升强化干物质积累,均通过优化根系形态提升水分吸收效率;三种作物在干旱胁迫下资源分配均向根系倾斜,花生表现为全生育期高根冠比,小麦体现为深层根系生物量增加,谷子则通过积累渗透调节物质优先保障根系功能。三种作物的共性响应印证了根系构型调整是作物抗旱的重要途径。

3.2 基于根系特性的抗旱种质及抗旱指标鉴选

隶属函数法通过整合多个指标对作物抗旱性进行综合评价,能有效克服单一指标的局限性与不稳定性,已在多种作物的抗旱性鉴定中展开了应用[30,31]。然而,仅隶属函数法仍存在一定局限。随着统计方法的不断发展,越来越多的研究倾向于将抗旱系数、主成分分析、隶属函数等多种方法结合使用,可降低单一评价方法所产生的误差,使评价结果更为全面、可靠,并已成功应用于诸多作物极端种质的鉴定[32-36]。

基于此,本研究结合综合抗旱系数法、灰色关联度分析、隶属函数分析三种分析方法计算供试样本的CDC值、WDC值和D值,相关性分析结果表明,苗期及全生育期的D值、CDC值、WDC值三者之间均呈极显著正相关($P<0.01$),其中CDC值与WDC值的相关性系数均达到1,与金欣欣[9]等研究结果一致,表明两种方法计算得分相近。不同生育时期各品种的抗旱性评价结果存在较大差异,表明抗旱性是一种受环境调控的复杂综合性状,具有明显的阶段特异性。因此,种质资源的抗旱性评价不能仅依赖单一时期,多个时期综合评价才能更加全面、客观地评价其抗旱性。结合D值、WDC值、CDC值对供试品种进行综合评价,筛选出苗期强抗旱型种质

3个,综合抗旱性表现最佳的品种为冀花8号;全生育期强抗旱型种质9个,GH01605为全生育期抗旱性最强品种。结合两个生育时期,鉴选出GH01605为供试品种内强抗旱品种。

作物抗旱性是由多指标共同作用的复杂生理过程,各指标在干旱胁迫下的响应程度存在差异,因此筛选与抗旱性高度相关的核心指标对品种鉴定至关重要[37]。本研究利用不同时期干旱相关性分析、灰色关联度分析相结合的方法鉴定出根系鲜重、根尖数为花生苗期干旱鉴定理想指标,这与前人在小麦[38]、油菜[39]、番茄砧木[40]等作物的研究结果相一致;根系干重、根系长度、根系体积为鉴定花生全生育期干旱的最佳指标。

3.3 不同干旱胁迫下根系对地上部生长及产量的影响

本研究以D值为自变量构建的6个线性回归方程中R^2均大于0.5,表明根系发达程度会显著影响植株整体抗旱表现。

D值与表型的关联程度受胁迫环境、植株生育时期的共同影响,苗期室内干旱表现为胁迫时间短、胁迫程度重的特点,且处于温室内,环境变量单一可控,此时花生处于营养生长初期,器官功能单一,地上部生长(株高、鲜重)与复水恢复能力的核心限制因子为根系水分吸收效率,根系抗旱能力强弱直接决定复水后植株存活状况与地上部生长,因此苗期D值与相对株高、相对地上部鲜重的R^2高于全生育期;而全生育期干旱表现为长期、渐进的特点,且处于开放性的田间环境下,多重环境变量会通过非根系途径间接影响地上部生长,降低了根系与地上部表型的直接关联度,导致相对株高、相对地上部鲜重的关联度低于苗期,但进入结荚期至收获期后,植株生长中心转移至生殖生长,根系吸收的水分优先分配给荚果以保障产量与干物质积累,这一生理特性使得D值与相对单株产量的关联度远超地上部性状。

王诗语[41]、丁红[42]、刘元军[43]等人的研究充分表明水分短缺是限制产量的重要因素,根系作为吸收水分的核心器官,其发达程度会显著影响产量。本研究中D值与产量的关联程度极显著,且Ⅴ类(强抗旱型)种质相对单株产量均值,较Ⅰ类(极度干旱敏感型)高出29.63%,表明了根系抗旱能力(D值)与产量呈正相关性,体现了根系发达种质在干旱环境下的产量优势。产量的形成依赖于地上部光合产物积累与地下根系水肥供给的协同支撑,发达根系在营养生长阶段吸水供给地上部,促进地上部的生长,而地上部光合同化产物为生殖生长阶段打下基础。而在生殖生长阶段当光合产物向产量高度倾斜时,稳定的水分供给成为产量的核心瓶颈,具有强抗旱性根系的花生植株能够更持续地满足地上部分光合积累及荚果灌浆的水分需求,从而保证产量的形成。

综上,D值虽是基于根系性状通过隶属函数计算所得,但并非仅仅反映根系抗旱性的独立表现,而是能够有效耦合植株地上部生长乃至产量的总体抗旱响应特征,在新疆干旱缺水的背景下鉴定具有强抗旱性根系的种质是首先做到保产的关键,这为本研究以根系相关指标作为抗旱鉴定指标并构建花生苗期及全生育期抗旱评价体系提供了数据支持及理论支撑。本研究鉴定出Z5205、豫花22、0215A(黑)、花育917四个抗旱及高产优异种质,也为以后抗旱及高产双优育种提供了宝贵亲本材料。

4 结论

本研究通过构建基于根系性状的苗期与全生育期综合评价体系,明确了花生抗旱鉴定的关键指标即苗期以根系鲜重和根尖数为优,全生育期以根系干重、长度和体积为佳,并成功筛选出多个兼具抗旱与高产潜力的优良材料,所建立的多个回归方程表明根系在地上部生长及产量形成方面发挥着重要作用。

参考文献:

[1] 任婧瑶.花生苗期耐旱生理机制及相关基因的表达[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.

[2] 闫彩霞,王娟,赵小波,等.全生育期鉴定筛选耐盐碱花生品种[J].作物学报,2021,47(3):556-565.DOI:10.3724/SP.J.1006.2021.04107.

[3] 闫利.全国人大代表孙东伟:在新疆发展花生产业建立我国油料作物安全屏障[N].消费日报,2024-03-12(A03).DOI:10.28866/n.cnki.nxfrb.2024.000254.

[4] Baroowa B, Gogoi N. Biochemical changes in two *Vigna* spp. during drought and subsequent recovery[J]. Indian J Plant Physiol, 2013, 18(4): 319-325. DOI:10.1007/s40502-013-0048-5.

[5] Ilyas M, Nisar M, Khan N, et al. Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach[J]. J Plant Growth Regul, 2021, 40(3): 926-944. DOI:10.1007/s00344-020-10174-5.

[6] Nadeem M, Li J J, Yahya M, et al. Grain legumes and fear of salt stress: focus on mechanisms and management strategies[J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(4): 799. DOI:

10.3390/ijms20040799.

[7] Akbari M, Sabouri H, Sajadi S J, et al. Classification and prediction of drought and salinity stress tolerance in barley using GenPhenML [J]. Sci Rep, 2024, 14: 17420. DOI:10.1038/s41598-024-68392-w.

[8] 王志颖.干旱胁迫对不同耐旱型花生苗期根毛区生长发育的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2024.

[9] 金欣欣,宋亚辉,苏俏,等.冀花系列高油酸花生抗旱性鉴定与综合评价[J].作物学报,2025,51(3):797-811.

[10] 艾鑫,王诗语,马鑫磊,等.不同油酸含量花生品种全生育期耐旱性鉴定指标筛选和综合评价[J].沈阳农业大学学报,2024,55(5):513-522.

[11] 曹凤岩,苑翠玲,刘玉龙,等.花生种质资源苗期抗旱性鉴定[J].花生学报,2024,53(4):88-99.DOI:10.14001/j.issn.1002-4093.2024.04.009.

[12] 刘永惠,詹成芳,沈一,等.不同花生品种(系)萌发期抗旱性鉴定评价[J].植物遗传资源学报,2016,17(2):233-238.DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.2016.02.006.

[13] 万丽云,苏威,李蓓,等.花生苗期干旱处理后转录和代谢通路分析[J].中国油料作物学报,2018,40(3):335-343.

[14] 丁红,张智猛,戴良香,等.不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应[J].生态学报,2013,33(17):5169-5176.

[15] 白宇捷,赵然,崔顺立,等.不同基因型花生抗旱性分级及鉴定[J].华北农学报,2025,40(4):107-118.

[16] 曹欢,姜骁,殷祥贞,等.不同时期干旱胁迫下花生品种抗旱性评价[J].花生学报,2025,54(1):60-71.DOI:10.14001/j.issn.1002-4093.2025.01.008.

[17] 任艳,姜晓静,崔潇,等.利用组培方法鉴定花生苗期抗旱性[J].山东农业科学,2020,52(1):42-45.DOI:10.14083/j.issn.1001-4942.2020.01.007.

[18] 葛家豪,雷欣月,王清明,等.苦荞苗期耐低磷种质筛选及耐低磷综合评价[J].作物学报,2025,51(11):2911-2922.

[19] 马群,王志昊,闫磊,等.高油酸和普通花生萌发期抗旱筛选评价体系的建立[J].作物学报,2025,51(12):3266-3280.

[20] 徐宗昌,鲁雪莉,姜奇彦,等.50份黄淮产区大豆种质资源苗期耐盐性评价[J].中国油料作物学报,2025,47(4):851-860.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2024055.

[21] 李阿蕾,戴志刚,陈基权,等.239份长果种黄麻种质资源萌发期耐镉性评价及耐镉资源筛选[J].作物学报,2023,49(10):2677-2699.

[22] 谭秦亮,程琴,李佳慧,等.不同甘蔗品种幼苗对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J].作物杂志,1-9[2025-10-17]. https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250804.1131.002.

[23] 牛小霞,马忠明,陈娟,等.春小麦品种萌发期抗旱性鉴定[J].种子,2025,44(7):112-117.DOI:10.16590/j.cnki.1001-4705.2025.07.112.

[24] 张宁宇,薛丽华,王聪,等.春大豆花荚期根系生长与耐旱性的关系研究[J].南京农业大学学报,1-12[2025-12-15]. https://link.cnki.net/urlid/32.1148.s.20250603.0927.002.

[25] 雷庭澍.小麦种质资源抗旱性鉴定及筛选[D].杨凌:西北农林科技大学,2025.

[26] 姜雅文,解文艳,何久兴,等.微生物种子包衣促进干旱条件下小麦种子萌发及幼苗生长[J].中国农业气象,2025,46(5):609-618.DOI:CNKI:SUN:ZGNY.0.2025-05-002.

[27] 白旭瑞.小麦苗期抗旱性鉴定及抗旱品种筛选[D].保定:河北农业大学,2020.

[28] 苗青霞,方燕,陈应龙.小麦根系特征对干旱胁迫的响应[J].植物学报,2019,54(5):652-661.

[29] 王晓春,陈彩锦,邓占钊,等.半干旱雨养农业区夏播饲草谷子生产性能和饲用品质综合评价[J].黑龙江畜牧兽医,2026,(1):142-145.DOI:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2025.03.0219.

[30] Li X Y, Luo L, Shi X P, et al. Screening drought tolerance in potato germplasm resources in the northwestern region of China[J]. BMC Plant Biol, 2025, 25(1): 777. DOI:10.1186/s12870-025-06716-2.

[31] 韩海蓉,徐亮,李开祥,等.不同生态型甘蓝型油菜抗旱性评价[J].北方园艺,1-15[2025-12-15].https://link.cnki.net/urlid/23.1247.S.20251105.1617.004.

[32] 曹欢,迟晓元,梁成伟,等.不同花生品种萌芽期抗旱性鉴定[J].种子科技,2024,42(21):42-48.DOI:10.19904/j.cn14-1160/s.2024.21.012.

[33] Zhao Y, Liu J, Kuerban Z, et al. Drought tolerance evaluation and classification of foxtail millet core germplasms using comprehensive tolerance indices[J]. Life, 2025, 15(9): 1485. DOI:10.3390/life15091485.

[34] Du W T, Zhang F L, Zhang L, et al. Comprehensive evaluation and screening of drought resistance in maize at germination and seedling stages[J]. Front Plant Sci, 2025, 16: 1672228. DOI:10.3389/fpls.2025.1672228.

[35] 郑巨云,王俊铎,龚照龙,等.棉花品种资源花铃期抗旱性鉴定与评价[J].干旱地区农业研究,2021,39(2):150-1-163.DOI:CNKI:SUN:GHDQ.0.2021-02-020.

[36] 吴芳,张静,杨红善,等.12份紫花苜蓿品种(品系)苗期抗旱性综合评价[J].中国草地学报,2025,47(6):66-77.DOI:10.16742/j.zgcdxb.20240301.

[37] 孙东雷,卞能飞,陈志德,等.花生萌发期耐盐性综合评价及耐盐种质筛选[J].植物遗传资源学报,2017,18(6):1079-1087.DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.2017.06.010.

[38] 刘舒晴.小麦陕农981突变体苗期根系的筛选及综合分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.

[39] 易荣.甘蓝型油菜苗期抗旱性评价与比较转录组分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
[40] 张志焕,韩敏,张逸,等.番茄砧木苗期耐旱性鉴定评价[J].生态学志,2016,35(3):719-725.DOI:10.13292/j.1000-4890.201603.005.
[41] 王诗语,李仍媛,艾鑫,等.开花下针期干旱-复水对花生根系发育、光合生理及产量形成的影响[J].中国油料作物学报,2024,46(6):1329-1338.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2023205.
[42] 丁红,张智猛,戴良香,等.水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(5):872-881.
[43] 刘元军.花生品种抗旱性与根系形态、分布及生理特性关系的研究[D].泰安:山东农业大学,2012.

(责任编辑:郭学兰)